

ELS SEDIMENTS DE LES CAVITATS CÀRSTIQUES DE LES BALEARS

per Joan J. FORNÓS¹, Joaquín GINÉS^{1,2}, Francesc GRÀCIA^{1,3} i Antoni MERINO^{1,4}

Abstract

This paper deals with current sedimentary processes that take place within the Balearic karst which leave proof of their existence by means of the accumulation of detritic deposits, either as entrance facies or inside the underground passages and chambers. The most characteristic assemblage of sedimentary facies present in the Balearic endokarst is described here along with the documentary research techniques applied to their description and analysis. Among the existing sedimentary facies and because of their mass and ubiquity, the reddish silty deposits emplaced by seepage and the dynamics of subterranean waters must be underlined. At the same time, the significant accumulation of boulders and gravels caused by breakdown processes are highlighted as well. The sedimentary record present in the area belonging to the littoral zone is of paramount importance. As a consequence of being related to the specific processes that happen in the coastal mixing zone, where the interference between continental and marine processes come about, the sedimentary record has been subject of detailed research. From a temporary point of view, the sedimentation in the littoral zone is controlled by paleoclimatic changes together with the dynamics of sea oscillations that have affected the karst system along the Pleistocene.

Resum

El present treball s'ocupa dels processos sedimentaris actuals que actuen dins del carst balear i que deixen constància de la seva existència mitjançant l'acumulació de dipòsits detrítics ja sigui com a fàcies d'entrada o a l'interior dels conductes i sales del medi hipogeu. Es descriu el conjunt més característic de fàcies sedimentàries presents a l'endocarst de les Balears així com les tècniques d'estudi emprades en la seva descripció i anàlisi. Entre les fàcies sedimentàries que s'observen hi destaquen pel seu volum i omnipresència, els llims vermells acumulats per la percolació i dinàmica de les aigües subterrànies i les grans acumulacions de blocs i gravats originades per processos d'esfondrament. D'especial importància és el registre sedimentari present a la zona que es correspon amb el carst litoral. Aquest ha estat especial objecte d'estudi, degut a la seva relació amb els processos específics que tenen lloc en la zona costanera de mescla d'aigües i on es dona la interferència entre els processos continentals i marins. Des d'un punt de vista temporal la sedimentació a la zona litoral ve controlada per les variacions paleoclimàtiques juntament amb la dinàmica d'oscil·lació marina que han afectat el sistema càrstic durant el Pleistocè.

Resumen

El presente trabajo se ocupa de los procesos sedimentarios actuales que actúan en el karst balear y que dejan constancia de su existencia mediante la acumulación de depósitos detríticos, ya sea como facies de entrada o en el interior de los conductos y salas del medio hipogeo. Se describe el conjunto más característico de facies sedimentarias presentes en el endokarst de las Baleares así como las técnicas de estudio utilizadas en su descripción y análisis. Entre las facies sedimentarias que se observan podemos destacar por su volumen y omnipresencia, los limos rojos acumulados por la percolación y dinámica de las aguas subterráneas y las grandes acumulaciones de bloques y gravas originados por los procesos de colapso. De especial importancia es el registro sedimentario presente en la zona que se corresponde con el karst litoral. Esta zona ha sido objeto de estudio específico, debido a su relación con los procesos que tienen lugar en la zona costera de mezcla de aguas y donde se produce la interferencia entre los procesos continentales y marinos. Desde un punto de vista temporal la sedimentación en la zona litoral está controlada por las variaciones paleoclimáticas junto con la dinámica de oscilación del nivel marino que ha afectado al sistema kárstico durante el Pleistoceno.

1 Karst and Littoral Geomorphology Research Group. Universitat de les Illes Balears. joan.fornos@uib.cat
2 Grup Espeleològic EST. Palma (Mallorca).

3 Grup Nord de Mallorca (GNM). Pollença (Mallorca).
4 Grup Espeleològic de Llubí. Llubí (Mallorca).

Introducció

La presència de sediments recents a l'interior de les cavitats càrstiques de les Illes Balears, encara que aquests siguin molt freqüents, no es pot considerar que assolixi nivells massa significatius. La manca de corrents subterranis continus de certa importància, així com la presència quasi exclusiva de materials calcaris i dolomítics d'elevada puresa en els rocams que formen les illes, fan que l'acumulació de sediments a l'interior de sales i conductes es pugui considerar relativament poc important. En la seva major part corresponen, sigui a materials grollers (blocs i graves) degudes a processos d'esfondrament, sigui a materials llimosos vermells aportats en la seva major part per la percolació i circulació de les aigües subterrànies. Les fàcies d'entrada també hi són presents, destacant-ne en aquest cas les aportacions de tipus eòlic i les relacionades amb la influència marina (GINÉS, 2000; GINÉS *et al.*, 2007a). Malgrat això, des d'un punt de vista qualitatiu, i especialment relacionats amb els processos que tenen lloc en les zones litorals, hi ha tota una munió de fàcies sedimentàries característiques de tots els processos que tenen lloc en aquestes àrees específiques modelades per la carstificació litoral (FORNÓS *et al.*, 2009).

Des de la dècada dels anys setanta del segle passat, la recerca del carst de les Balears s'ha realitzat de forma sistemàtica des d'un punt de vista científic (GINÉS & GINÉS, 1995a; 2002). Aquesta recerca ha sofert un increment substancial en els darrers deu anys gràcies a l'interès i a la integració de diversos grups espeleològics locals, la creació d'un grup de recerca a la Universitat de les Illes Balears, així com també les activitats d'alguns grups de científics de fora les nostres fronteres que han centrat el seu punt de recerca a les nostres illes. Això ha fet avançar força el coneixement dels processos i carac-

terístiques morfològiques i espeleogenètiques del carst balear (GINÉS & GINÉS, 2011). Aquest interès però, no ha tingut massa en compte, més que amb comptades excepcions, el registre sedimentari present a l'interior de les sales i conductes.

Per altra part, el coneixement del medi hipogeu s'ha vist especialment incrementat en el moment en que s'ha pogut accedir de forma sistemàtica a les parts submergides de les cavitats mitjançant les complexes tècniques de l'espeleobusseig, que s'han desenvolupat de forma especialment important a les zones càrstiques litorals de Mallorca (GRÀCIA *et al.*, 2007a). Malgrat estar encara al que podríem considerar les beceroles, és a partir d'aquest moment en el qual el registre sedimentari ha estat també tingut en consideració de forma sistemàtica com a un element més a tenir present per tal de donar resposta al conjunt de processos que actuen en aquestes àrees (GRÀCIA *et al.*, 2006, 2007b; FORNÓS *et al.*, 2009).

A la literatura científica sobre el carst, el registre sedimentari tampoc ha estat un tòpic de recerca clau, fet que fa que siguin pocs els treballs que recopilen de forma específica la temàtica sedimentària (FORD, 2001; SASOWSKY & MYLROIE, 2004), encara que sí hi ha una abundant bibliografia parcial que la té en consideració (GILLIESON, 1996; FORD & WILLIAMS, 2007; PALMER, 2007, entre d'altres).

L'objectiu del present treball és passar revista al conjunt de fàcies presents en el registre sedimentari de les galeries i sales del carst balear, al conjunt de processos que les han originades així com a les tècniques i metodologies emprades en el seu estudi. Val a dir que, fins al moment, les investigacions s'han centrat gairebé exclusivament en les coves costaneres del Migjorn i Llevant de Mallorca.

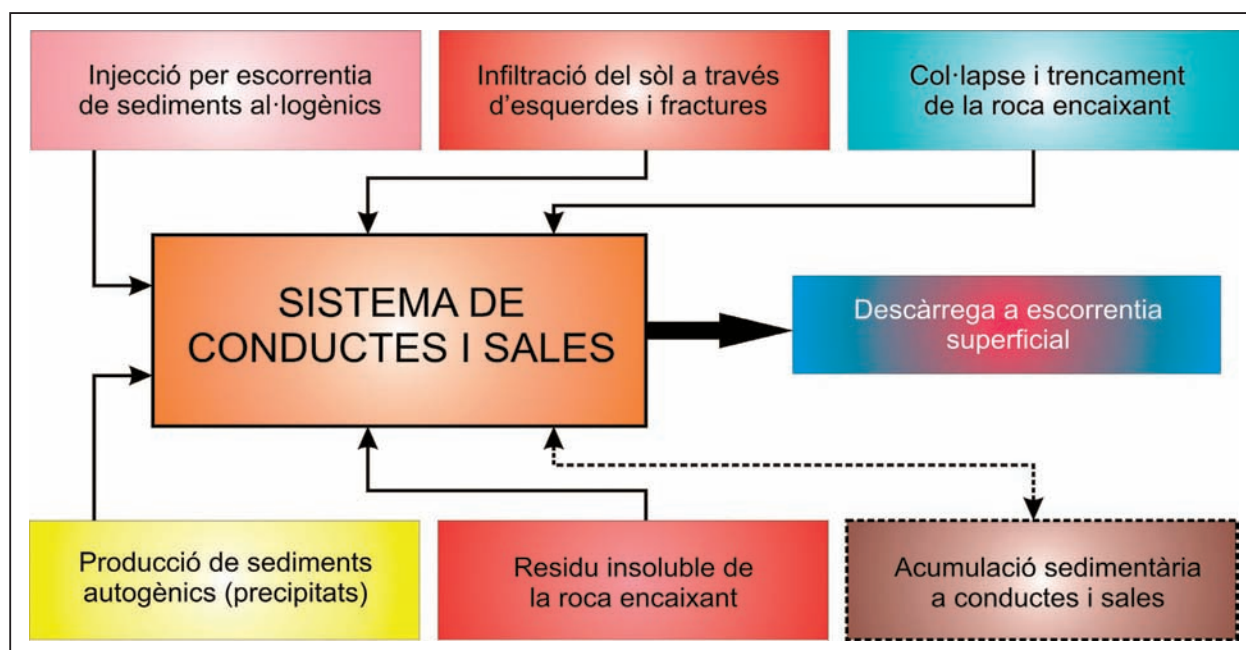


Figura 1: Diagrama de flux del balanç sedimentari dins d'un aquífer càrstic (modificat de BOSCH & WHITE, 2004).

Figure 1: Flow sheet for sediment budget within a karst aquifer (modified from BOSCH & WHITE, 2004).

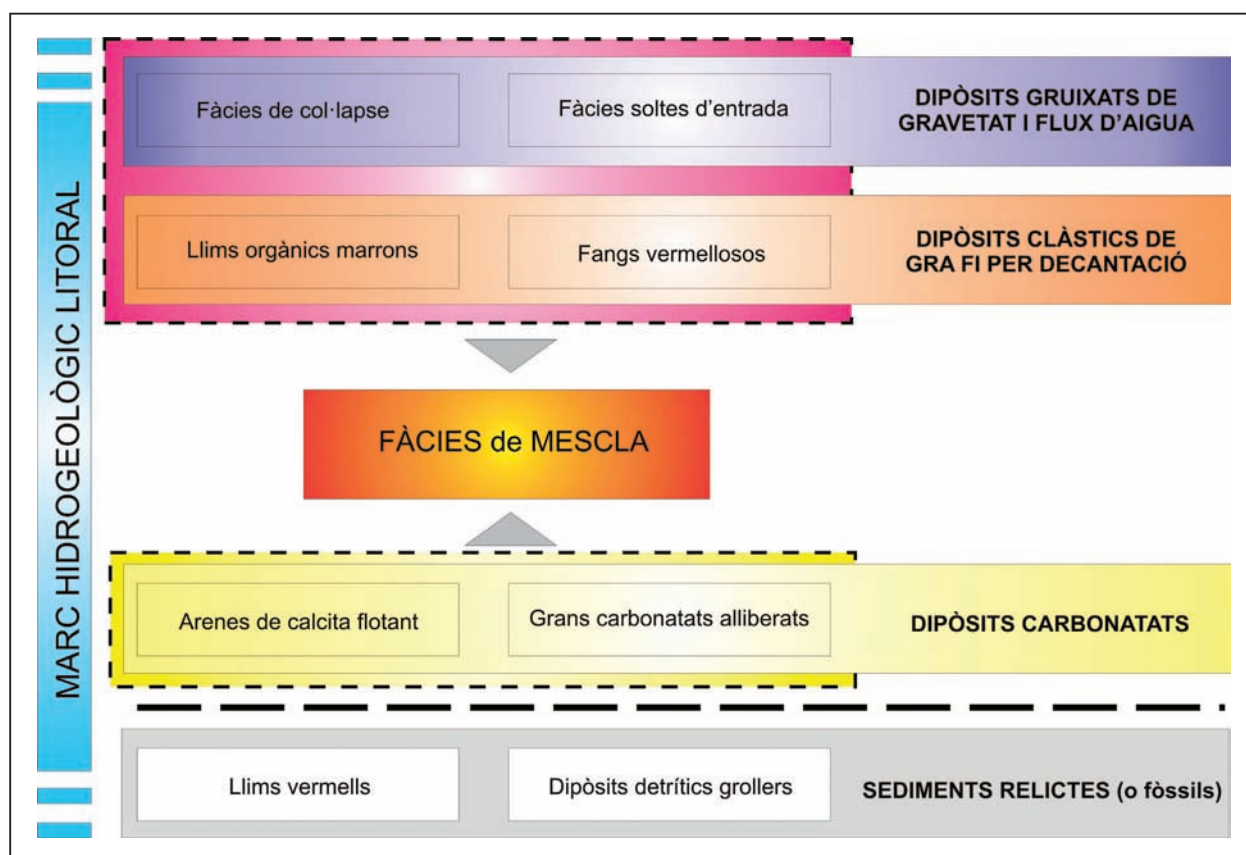


Figura 2: Esquema amb les facies sedimentàries presents a les coves litorals del Migjorn de Mallorca (modificat de FORNÓS *et al.*, 2009).

Figure 2: Sketch showing the sedimentary facies observed in littoral caves of the Migjorn area of Mallorca (modified from FORNÓS *et al.*, 2009).

Metodologia utilitzada en l'estudi del registre sedimentari balear

La metodologia utilitzada en l'estudi dels sediments que rebleixen les cavitats del carst balear ha estat la habitual en la major part dels estudis sedimentològics, utilitzant en cada moment les tècniques més avançades disponibles. L'estudi passa en primer lloc per la recollida de les mostres, les quals majoritàriament s'han recollert de forma manual seguint els punts d'interès (GINÉS *et al.*, 2007a; FORNÓS *et al.*, 2010), i aixecant columnes estratigràfiques de detall amb indicació de la presència de restes paleontològiques si es donava el cas. En els treballs descriptius dels reblliments de les cavitats subaquàtiques, ha estat freqüent la utilització de sondeigs manuals obtinguts mitjançant la penetració dins la columna sedimentària de tubs de PVC (GRÀCIA *et al.*, 2007b).

Un cop etiquetades i embossades les mostres són traslladades al laboratori on, després d'una primera descripció superficial amb l'ajuda de la lupa binocular, descripció del color mitjançant la utilització de taules MUNSELL® i del seu rentat i posterior dessecació a l'estufa, les mostres són sotmeses a diversos anàlisis per tal d'obtenir les seves característiques texturals i de mida de gra així com de composició mineralògica. Per a les anàlisis texturals (granulometries) s'utilitzen tant els

sistemes tradicionals de tamisatge o mètode de la pipeta (TUCKER, 1988), com els que utilitzen les modernes tècniques del làser tipus Coulter per analitzar la mida de gra en sediments especialment fins (BEUSELINCK *et al.*, 1998). Amb les dades obtingudes es representen les corbes acumulatives i els histogrames de freqüències, a partir dels quals es calculen els paràmetres estadístics descriptius que permeten deduir els processos hidràulics que els han originat. Per a l'anàlisi de la composició mineralògica se sol polvoritzar la mostra i la seva pols, orientada a l'atzar o no en funció del contingut en argiles, s'introdueix dins un difractòmetre de raigs X. L'anàlisi semi-quantitativa de cada mostra es realitza utilitzant el software associat basant-se en les àrees dels pics obtinguts en els difractograms (TUCKER, 1988); les dades permeten d'aquesta forma avaluar les possibles àrees font del sediment. L'estudi es complementa amb la utilització de microscòpia electrònica d'escandallatge (SEM), molt freqüent no tan sols per observar les característiques morfològiques superficials, sinó també per saber-ne la composició elemental gràcies als equips associats com són els detectors d'EDX.

La datació dels reblliments sedimentaris també s'ha intentat amb diferents taxes d'èxit. La tècnica del Carboni-14 aplicada a partir de restes orgàniques, introduïdes per corrents superficials cap a l'interior de la cavitat (FORNÓS & GRÀCIA, 2007), ha permès datar alguns sediments de coves càrstiques litorals com a relativament recents.

Altres tècniques emprades en l'estudi dels sediments en altres països, la termoluminiscència, OSL, l'ESR, o l'anàlisi isotòpica de radionucleïds cosmogènics, encara no s'han aplicat als sediments que reomplen els sistemes càrstics de les Balears (BERGER *et al.*, 2008, entre d'altres). En canvi, el paleomagnetisme ha estat utilitzat amb èxit per a la datació de sediments detrítics del Pliocè superior, que contenen restes paleontològiques, en cavitats de la Serra de Tramuntana com per exemple la Cova de Canet, a Esporles (PONS-MOYA *et al.*, 1979).

El cicle sedimentari a l'interior del sistema càrstic

L'estudi dels sediments dins qualsevol sistema càrstic es pot emprendre globalment entenent-ho com al balanç sedimentari entre els diversos fluxos de materials que tenen lloc a través de la superfície i del sistema subterrani d'una determinada conca càrstica. A la figura 1 es pot observar, en un diagrama de flux modificat de BOSCH & WHITE (2004), el conjunt de processos que afecten a aquest balanç sedimentari dins del carst. En el cas de les coves investigades en el Migjorn i Llevant de Mallorca, aquest esquema es veu afectat per les particularitats hidrogeològiques d'aquest carst eogenètic costaner, caracteritzat per l'elevada permeabilitat de les roques carbonatades del Miocè superior i per una recàrrega superficial relativament limitada (GINÉS & GINÉS, 2007; GINÉS *et al.*, 2008; FORNÓS *et al.*, 2009).

Tot seguit es descriuran les fàcies representatives dins del registre sedimentari de les coves balears, amb especial referència a les cavitats estudiades en els carsts costaners de l'illa (Fig. 2).

Fàcies sedimentàries

FÀCIES DE BRETXES DE COL-LAPSE

Aquesta fàcies, que és volumètricament la més important dins del carst de les Balears, està formada per l'acumulació, normalment en grans cossos en disposició campaniforme (Fig. 3), de fragments de roca que poden oscil·lar des de palets de pocs centímetres fins a grans blocs de més de 15 m. Els grans mostren les vores anguloses a subanguloses en funció de la litologia implicada i presenten una pèssima classificació, quasi sempre sense matriu ni tampoc ciment que uneixi els grans. La seva composició, calcàries o dolomies i calcarenites, correspon a la litologia de la roca encaixant on se situa la cavitat. La mida i la forma dels grans està relacionada amb la gruixa de l'estratificació que correspon, en línies generals, a estrats de gruixa decimètrica a mètrica. Encara que presenten una distribució que podem considerar caòtica, puntualment s'hi observa un cert grau d'orientació preferent, no imbricació, donada per la forma aplanada de la majoria dels fragments rocosos,

que segueixen la disposició campaniforme anteriorment comentada corresponent als cons d'acumulació dels esbaldregalls. El grau de transport d'aquests sediments és pràcticament inexistent.

Aquesta fàcies correspon a l'acumulació de fragments de roca, i fins i tot estrats, caiguts des del sostre i/o parets de la cavitat, normalment com a conseqüència de la pèrdua sobtada de consistència, deguda a la pròpia dinàmica evolutiva del carst i als processos de variació del nivell freàtic.

FÀCIES CLÀSTIQUES GROLLERES FLUVIALS

La càrrega clàstica aportada pels corrents superficials –de vegades al·logènics– que s'infiltra en el carst, és un tema clàssic del registre sedimentari càrstic (BOSCH & WHITE, 2004; FORD & WILLIAMS, 2007). El tipus de càrrega que aporten aquests corrents depèn dels condicionants geològics i topogràfics de la conca que drena cap als engolidors i altres formes superficials del carst. A les cavitats de les Balears aquest tipus de deposició sedimentària és molt minsa, per mor de l'escassetat de corrents superficials que s'infiltra de forma massiva sota terra, i correspon en general a litologies carbonatades. Els materials transportats a les conques amb elevat relleu consisteixen en materials grollers, còdols de diverses dimensions i amb un elevat grau d'arrodoniment, en tant que a conques amb un relleu baix, la sedimentació dels materials fins, llims i argiles, és la dominant (SASOWSKY & MYLROIE, 2004).

A les Balears, la presència dels materials grollers transportats per corrents subterranis la podem considerar esporàdica (Fig. 4), essent destacable tan sols en algunes localitats de la Serra de Tramuntana i sempre amb molt poca rellevància (Cova de les Rodes, a Pollença; Avenc des Gel, a Escorca). Es tracta de graves i còdols de diverses dimensions que han estat parcialment classificats en el seu transport al llarg dels conductes, en funció del recorregut fet i de la intensitat del corrent que els ha arrossegat. En qualsevol cas, mai arriben a formar acumulacions importants. El cas dels materials fins, per la seva importància, el comentarem a continuació com a una fàcies separada.

FÀCIES CLÀSTIQUES FINES

Incloem dins d'aquesta fàcies a tot el conjunt de sediments fins formats majoritàriament per llims, encara que també hi són presents les argiles en diverses proporcions, que han estat transportats cap a l'interior dels conductes com a càrrega en suspensió pels corrents que circulen dins del sistema càrstic. S'assimilarien a les denominades “*slackwater facies*” de BOSCH & WHITE (2004).

Es tracta de llims i argiles vermelloses que presenten un grau de classificació de moderat a bo, amb una mitjana de la mida de gra que oscil·la al voltant de la mida llim gruixada a mitjana (Fig. 5). Aquests sediments són molt freqüents, quasi omnipresents, en totes les cavitats de les Balears encara que amb una distribució i unes acumulacions volumètriques molt variables. La importància en la seva acumulació sedimentària depèn,

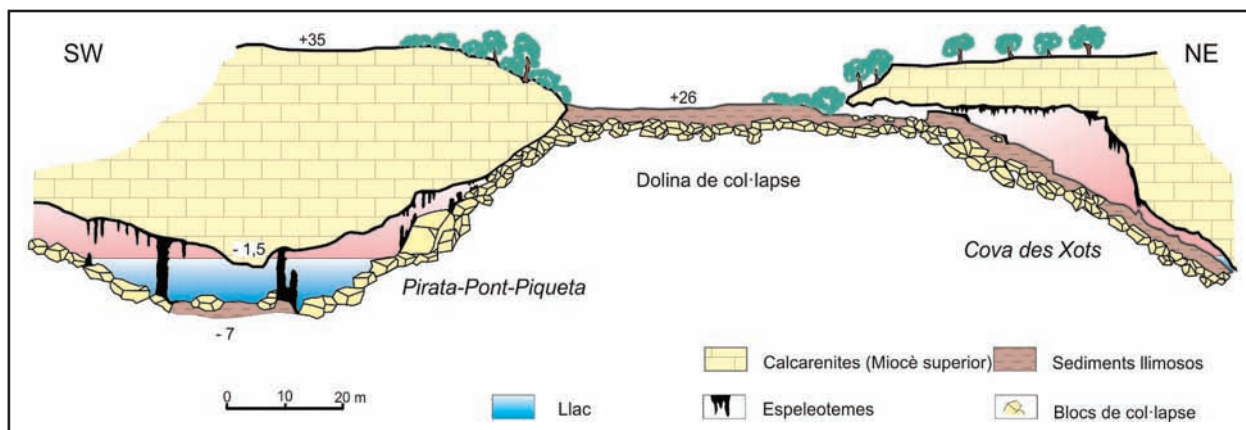


Figura 3: Secció geomorfològica tipus de les entrades de les cavitats de les Balears amb els dipòsits de col·lapse associats (sistema de cavitats Pirata-Pont-Piqueta, Manacor).

Figure 3: Geomorphological section of one of the common entrances of the Balearic caves with related breakdown sediments (Pirata-Pont-Piqueta cave system, Manacor).

entre d'altres aspectes, de la proximitat als punts d'entrada dels corrents que les transporten, siguin entrades per col·lapse, siguin avencs, o esquerdes i fractures més o menys obertes. Malgrat tot també es poden trobar en llocs allunyants de les zones de recàrrega, com és per exemple el sífó terminal de la Font des Verger (en el Barranc de Biniaraix, Sóller). Aquests dipòsits normalment mostren potències molt irregulars (des d'alguns metres fins a tan sols alguns mil·límetres) formant capes que s'adaptin a la morfologia dels conductes amb una laminació que quan s'hi observa és incipient, o formant fins i tot, cons d'acumulació quant l'alimentació és vertical o lateral. Aquesta acumulació de materials fins ve controlada la majoria de vegades per la topografia dels conductes que modifica les característiques del règim hidràulic, i que pot donar lloc a la decantació puntual dels llims i argiles transportats pels corrents subterranis.

En funció de la intensitat dels corrents i de la relació amb el moviment de les aigües freàtiques, aquests llims podran ser transportats més o menys cap a l'interior del sistema, produint-se així una certa granoclassificació, o la simple deposició del material fi (argiles) per decantació en superar el nivell freàtic.

En les zones properes a les entrades, i relacionades principalment amb el carst litoral del Migjorn i Llevant de Mallorca, per davall del nivell freàtic és comú l'observació de fines laminacions mil·limètriques, que alternen la deposició terrígena vermella amb l'acumulació de matèria orgànica procedent de l'exterior la qual cosa li dona una tonalitat més obscura i/o bruna. Aquesta alternant laminació no té cap característica estacional sinó tan sols dona indicació de les successives aportacions torrencials en moments de fortes tempestes (FORNÓS *et al.*, 2009).

La composició del sediment correspon, en la seva major part, als materials del sòl edàfic introduïts en moments de fortes precipitacions per les aigües d'infiltració que els arrossegueu cap a l'interior del carst mitjançant esquerdes i entrades més o menys obertes. Tradicionalment, la composició siliciclàstica que mostren aquests sediments s'ha considerat que procedeix en darrera instància de les acumulacions de pols procedent del desert del Sàhara en les denominades pluges de fang (FIOL, *et al.*, 2005; GOUDIE & MIDDLETON, 2001). A aquesta acumulació, que denominariem al·lòctona, se li

ha d'afegir el propi residu resultant de la dissolució de la roca carbonatada encaixant, de composició similar però en una molt baixa proporció degut a la puresa dels materials carbonatats que componen les principals unitats geològiques on s'hi desenvolupa el carst (FORNÓS & GELABERT, 1995).



Figura 4: La presència de dipòsits amb certes connotacions fluvials, com són els còdols rodats, no és un fet massa comú a les coves de Balears (Avenc des Güell, Escorca; foto A. Merino).

Figure 4: Presence of fluvial rounded pebbles in the balearic caves it's not common (Avenc des Güell, Escorca; photo A. Merino).



Figura 5: Sediments llimosos vermells amb Fe i Mn al tram final de la Galeria Navarrete de la Cova des Pas de Vallgornera, Llucmajor (foto A. Merino).

Figure 5: Red silty sediments with abundant Fe and Mn in the final section of Galeria Navarrete at Cova des Pas de Vallgornera, Llucmajor (photo A. Merino).

FÀCIES CLÀSTIQUES DE TALÚS D'ENTRADA

La major part de cavitats de les Balears que tenen obertures a l'exterior reben les aportacions de les aigües d'escorrentia en moments de fortes precipitacions, la qual cosa fa que la infiltració d'aquestes aigües arrossegui material clàstic de mides molt diverses. En aquestes situacions, tendeixen a acumular-se en el talús d'entrada les fàcies més grolleres (WHITE, 2007) en tant que els materials més fins són introduïts cap a zones més internes en funció de les característiques geomorfològiques de cada cavitat i de la intensitat dels fluxos aquosos, en el que podríem denominar com una "injecció fluvial-torrencial-col·luvial des de la superfície".

La principal característica d'aquestes fàcies és la seva irregularitat quant a mida i forma del gra. Es tracta d'una acumulació de bretxes formades per grans mida palet, còdol i/o bloc de subangulosos a subarrodonits, que mostren en la seva acumulació una feble gradació inversa. La matriu pot ser totalment absent donant una textura de l'acumulació tipus "openwork" (sense matriu); quant la matriu hi és present, sempre de forma molt irregular, està composta en la seva major part per llims vermells procedents també de l'exterior. A les zones més internes de les cavitats aquests sediments es correspondrien amb les "backswamp facies" descrites per BOSCH & WHITE

(2004), caracteritzades pel seu caràcter heteromètric i el transport més aviat curt que han sofert els materials.

FÀCIES D'ENTRADA: EOLIANITES

El registre sedimentari de materials eòlics a les cavitats és relativament freqüent. Els exemples disponibles de caveres que allotgen fossilitzacions al·lòctones d'origen dunar, inclouen en la seva major part acumulacions còniques de materials arenosos dipositades per gravetat en l'interior de cavitats càrstiques.

Esmentarem en el cas de l'illa de Mallorca els sediments de la Cova de s'Ònix (Fig. 6), a Manacor (GINÉS *et al.*, 2007a), els dipòsits possiblement würmians presents a la Cova de sa Bassa Blanca, a Alcúdia (GINÉS & GINÉS, 1974), així com les arenes dunars del Riss existents a l'entrada del Secret des Moix, també a Manacor (GINÉS *et al.*, 1975; GINÉS, 2000). A l'illa de la Dragonera, cal referir-se a la duna Riss dipositada a l'interior de la Cova des sa Font (EGOCZUE, 1971), mentre que a Cabrera és obligat esmentar els sediments arenosos de la Cova des Frare, atribuïts al Pleistocè inferior (MATEU *et al.*, 1979). A l'illa de Menorca, la Cova de sa Duna (Alaior) conté dipòsits d'arenas eòliques corresponents al Pleistocè superior (QUINTANA & ARNAU, 2004).

En tots els casos es tracta de sediments consolidats o semi-consolidats que indiquen una edat superior a l'holocena i que en la majoria dels casos donen indicació d'antigues entrades a les cavitats, avui en dia taponades per la seva acumulació. Cap d'aquests registres eòlics ha estat directament datat i tan sols s'han pogut situar cronològicament en alguns casos per la presència de restes esquelètiques de vertebrats (FORNÓS *et al.*, 2010), com és el cas de la Galeria del Tragus a la Cova des Pas de Vallgornera que les situaria en el Pliocè superior, al voltant dels 2,4 Ma (BOVER *com. pers.*).

Des d'un punt de vista sedimentològic, en tots els casos es tracta d'arenas bioclàstiques (arenas fines carbonatades) molt ben classificades i amb petites proporcions de materials argilosos, en les quals normalment només és observable una estratificació incipient consistent en fines laminacions mil·limètriques, donades per la variació en la mida de gra i pels diferents graus de cimentació que poden presentar. Generalment consisteixen en arenas de gra fi amb una bona classificació; la forma dels grans d'arena mostra un bon grau d'arrodoniment i un cert poliment. La seva composició és principalment carbonatada, essent-ne la calcita el mineral principal.

La presència dels components silícics llimosos vermells –que són dominants en la fracció més fina, quan aquesta hi és present– indica la remobilització i mescla de les arenas eòliques amb els materials fangosos

corresponents a les aportacions externes detrítiques, mitjançant l'escorrentia procedent de la infiltració superficial. També hi són freqüents els fragments angulosos mida grava, palet o superior procedents de la caiguda gravitacional de fragments procedents de les parets de les cavitats, així com la presència d'algunes restes fòssilíferes, com ja hem comentat.

Les característiques texturals i la composició carbonatada (bioclàstica) de les arenas, així com el seu bon grau de classificació i la mitjana de la mida de gra d'arena fina, permeten interpretar aquestes arenas com a de procedència eòlica, dipositades a través d'antigues obertures, en tots els cassos no massa llunyanes. La manca d'estructures tractives, que no han estat observades, fa pensar en el seu emplaçament mediatitzat per processos d'escorrentia molt poc dinàmics, els quals no han jugat un paper important en la deposició global d'aquestes arenas.

FÀCIES D'ENTRADA D'ORIGEN MARÍ

Els aspectes geomorfològics i sedimentaris, a les zones càrstiques litorals són molt complexes. Graves, però sobretot arenas d'origen marí (bioclàstiques), emplaçades directament per la mar o també pel vent que retreballa els cinturons i cordons litorals (en aquest cas concret correspondrien a les fàcies descrites anterior-



Figura 6: Sediments d'origen eòlic a la Cova de s'Ònix (Manacor). Foto J.J. Fornós.

Figure 6: Eolian sediments in Cova de s'Ònix (Manacor). Photo J.J. Fornós.



Figura 7: La influència marina quasi directa provoca l'onatge que modela la platja arenosa a l'interior de la Cova de na Mitjana (Capdepera). Foto B.P. Onac.

Figure 7: Sandy beach deposits deposited by the waves due to the direct marine influence at Cova de na Mitjana (Capdepera). Photo B.P. Onac.

ment d'eolianites), es poden introduir dins les coves costaneres i incorporar-se al seu registre sedimentari (GINÉS & GINÉS, 1986, 1995b; GINÉS, 2000). Un exponent d'aquestes situacions són per exemple les autèntiques platges (Fig. 7) presents a l'interior de la cova de na Mitjana (GINÉS *et al.*, 1975, 2007b) on també s'hi pot observar les restes de l'activitat dels organismes bentònics. Amb tot però, el més freqüent és observar les morfologies d'erosió marina a les entrades de les cavitats litorals, essent possible constatar també que un gran nombre de coves situades a la línia de costa són el resultat de la captura de fenòmens càrstics, per part dels mecanismes d'erosió específics de la franja litoral (MONTORIOL-POUS, 1972; GINÉS, 2000; GRÀCIA *et al.*, 2001, 2010). Dins d'aquest context, és necessari tenir en consideració les oscil·lacions del nivell marí durant el Quaternari (VAN HENGSTUM *et al.*, 2011).

FÀCIES CARBONATADES NO CLÀSTIQUES (AUTÒCTONES)

Incloem dins d'aquest grup de sediments dues fàcies totalment antagòniques pel que fa al seu procés de formació (precipitació / dissolució) i que són característiques de la zona freàtica en el carst litoral.

En el primer cas es tracta d'arenas formades per l'acumulació de làmines de calcita flotant (Fig. 8), mida arena mitjana, que poden arribar a superar els 40 cm de

potència (FORNÓS *et al.*, 2009; GRÀCIA *et al.*, 2007a, 2007b) però de manera molt irregular, formant una espècie de tel que recobreix el fons dels llacs presents en algunes sales, i mostrant una forma cònica d'amuntegament (Fig. 9). Els grans d'arena estan formats per cristalls romboèdrics de calcita que mostren símptomes parcials de corrosió. Aquest tipus de dipòsits és abundant en el trespol dels llacs, a sales amb la superfície lliure de l'aigua que permet la desgasificació del CO₂. Aquest procés controla la precipitació de les làmines de calcita flotant a la superfície dels llacs on es mantenen per flotació fins que el propi pes pel seu creixement, o algun efecte extern com pugui ser el degoteig des del sostre de la cavitat, fa que se superi la tensió superficial de l'aigua i acabin per acumular-se al fons del llac.

En el segon cas, es tracta de l'acumulació de partícules carbonatades (grans) que han estat alliberades des de les parets de la cavitat per processos fisicoquímics de meteorització, ja sigui en condicions subaquàtiques (Fig. 10) o fins i tot aèries. Es tracta de l'acumulació d'arenas fines a mitjanes de poca potència, normalment no superen els 20 cm (FORNÓS *et al.*, 2009), que mostren corbes de mida de gra bimodals i amb una mala classificació. Aquests dipòsits estan formats en la seva majoria per grans de composició calcítica, encara que també hi és present la dolomita. Aquests nivells carbonatats solen presentar-se mesclats amb sediments llimosos vermells (fàcies mesclades). Aquesta fàcies carbonatada particulada sol ser la que presenta una tex-

tura més gruixada, deixant de banda la produïda pels processos gravitatoris i de trencament. La seva acumulació es deu a la resposta diferencial als processos de meteorització i corrosió sobre les parets de la cavitat, formades per roques calcarenítiques en les quals els bioclasts responen de forma diferent a la corrosió en funció de la seva textura i mineralogia. Aquesta fàcies és especialment abundant en aquelles zones freàtiques del carst litoral en les qual es dona la corrosió per la mescla d'aigües i on la presència d'haloclines és freqüent (GRÀCIA *et al.*, 2007b).

Discussió i conclusions

L'acumulació sedimentària a les coves de les Balears és deguda a un ampli ventall de mecanismes sedimentaris relacionats amb els diferents processos geomorfològics que actuen al llarg del sistema de cavitats –tant en condicions vadoses com freàtiques, i amb més o menys influència exterior– fet que implica la presència tant de sediments que podem considerar al·lòctons, procedents del exterior, com autòctons, produïts a l'interior de les cavitats. En molts dels casos, aquests processos es troben mediatitzats pel caràcter costaner dels principals carsts de les Balears, fet que és responsable de la

presència d'algunes fàcies específiques ben individualitzades (Fig. 11).

Una bona part dels mecanismes involucrats en la deposició sedimentària corresponen al col·lapse i trencament de les roques del sostre o parets de les cavitats,

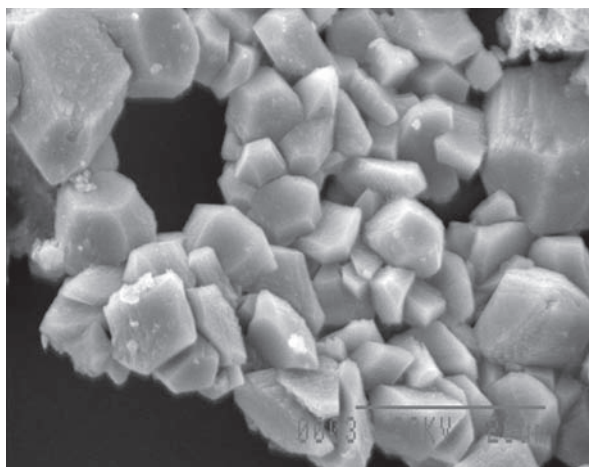


Figura 8: Cristalls de calcita euhedrals corresponents a una làmina de calcita flotant, dipositats com a un gra sedimentari al fons d'un llac d'una cova litoral.

Figure 8: Euhedral calcite crystals of a floating raft deposited as a sedimentary grain at the bottom of a coastal cave pool.



Figura 9: Acumulació de sediments carbonatats, silícics i mesclats recobrint de forma extensiva el trespòl de la Galeria de les Còniques a la Cova de sa Gleda (Manacor). Al centre de la imatge destaquen les estructures còniques produïdes per l'acumulació de calcita flotant. Foto C. Bodi.

Figure 9: Carbonate, silicic and mixed sediments extensively covering the floor of Galeria de les Còniques, in Cova de sa Gleda (Manacor). It must be highlighted the presence of conical structures (far center) due to the accumulation of sunken calcite rafts. Photo C. Bodi.



Figura 10: Corrosió incongruent de les calcarenites que componen la paret d'una cavitat relacionada amb la zona de mescla d'aigües, que dona lloc a la formació d'abundant sediment carbonatat per desintegració granular.

Figure 10: Incongruent corrosion of wall rock calcarenites related to the mixing zone gives way to a granular disintegration producing abundant carbonate sediment.



procés que dona lloc a dipòsits molt diversos des d'un punt de vista quantitatiu i textural. Aquestes acumulacions poden arribar a ser molt importants, donant des de grans amuntegaments de bretxes amb un grau de classificació molt baix, fins a la simple presència de només alguns blocs o fragments angulosos dins d'altres sediments.

L'altre gran grup de dipòsits presents a les cavitats són les acumulacions de materials fins, en els que gairebé sempre domina la mida llim, amb coloracions vermelloses a brunes per l'acumulació de matèria orgànica (Fig. 12). Aquests tipus de sediments, que en el cas de Balears podem considerar quasi bé omnipresents, corresponen en la seva major part als episodis esporàdics amb precipitacions més o menys intenses, que creen fluxos efímers d'aigües que penetren dins les cavitats per les seves obertures, normalment produïdes per col·lapse. Després de deixar el material més groller a les entrades (fàcies d'entrada clàstiques), les fàcies més fines són redistribuïdes pels conductes al seu interior on s'acumulen normalment per decantació d'acord a les característiques hidràuliques del cos d'aigua i de les propietats de

Figura 12: Acumulació sedimentaria amb abundants restes paleontològiques a la Cova des Moro (Manacor). Foto J.J. Fornós.

Figure 12: Sedimentary deposits with abundant paleontologic remains at Cova des Moro (Manacor). Photo J.J. Fornós.

la mida de gra del material transportat. La distància a la que poden arribar a l'interior de la cavitat dependrà de la geometria i morfologia del sistema i de l'impuls inicial del cos d'aigua després d'una forta precipitació, així com de la interacció d'aquesta amb el moviment a l'interior de l'aquífer un cop s'arribi al nivell freàtic.

Diffícil de distingir d'aquests nivells, i moltes vegades estretament interrelacionats amb ells, són les acumulacions en aquests cas de materials on hi predomina més la fracció argila, procedents de l'arrossegament de partícules del sòl edàfic per infiltració de les aigües que percolen a través de la porositat i la fracturació de la roca, i també de l'arrossegament de les pròpies impureses que queden després de la dissolució de la roca encaixant. L'elevada puresa de les roques carbonatades presents a les Balears fa però que aquesta proporció sigui molt baixa respecte al material que podríem considerar al·lòcton. La seva composició mineralògica a més, indica una procedència força llunyana relacionada en gran part amb les pluges de fang de procedència africana (FIOL *et al.*, 2005).

Un dels trets més destacables del carst de les Balears, en comparació amb altres carsts considerats clàssics, és la gran escassetat de sediments clàssics fluvials.

Bona part d'això es deu a la manca de corrents estables superficials que arribin a introduir-se dins del carst als engolidors. També, l'estructura geològica de les illes conformada per una sèrie de làmines encavalcants de poca dimensió, separades per nivells impermeables, no afavoreix la formació i desenvolupament d'una xarxa de drenatge favorable per al transport de materials. Així mateix la gran porositat de bona part de les unitats, sobretot miocenes, on s'hi desenvolupa el carst fan que no hi hagi pràcticament cap sistema de corrents més o menys estable capaç de transportar material particulat d'una certa dimensió a través dels conductes. No solament això, sinó que la dominància total de roca carbonatada implica un predomini del transport per dissolució i la manca de matèria primera no calcària per ser transportada per rodadura o arrossegament. Només a la Serra de Tramuntana hi ha algun sistema més o menys desenvolupat on penetren massivament petits corrents superficials però, en qualsevol cas, les àrees de recàrrega subaèria es poden considerar molt poc extenses.

L'obertura dels sistemes càrstics a l'exterior ve donada, en la major part dels casos, per l'esfondrament de les cavitats i conductes primigenis. Aquest fet és especialment freqüent a les zones litorals promogut per les

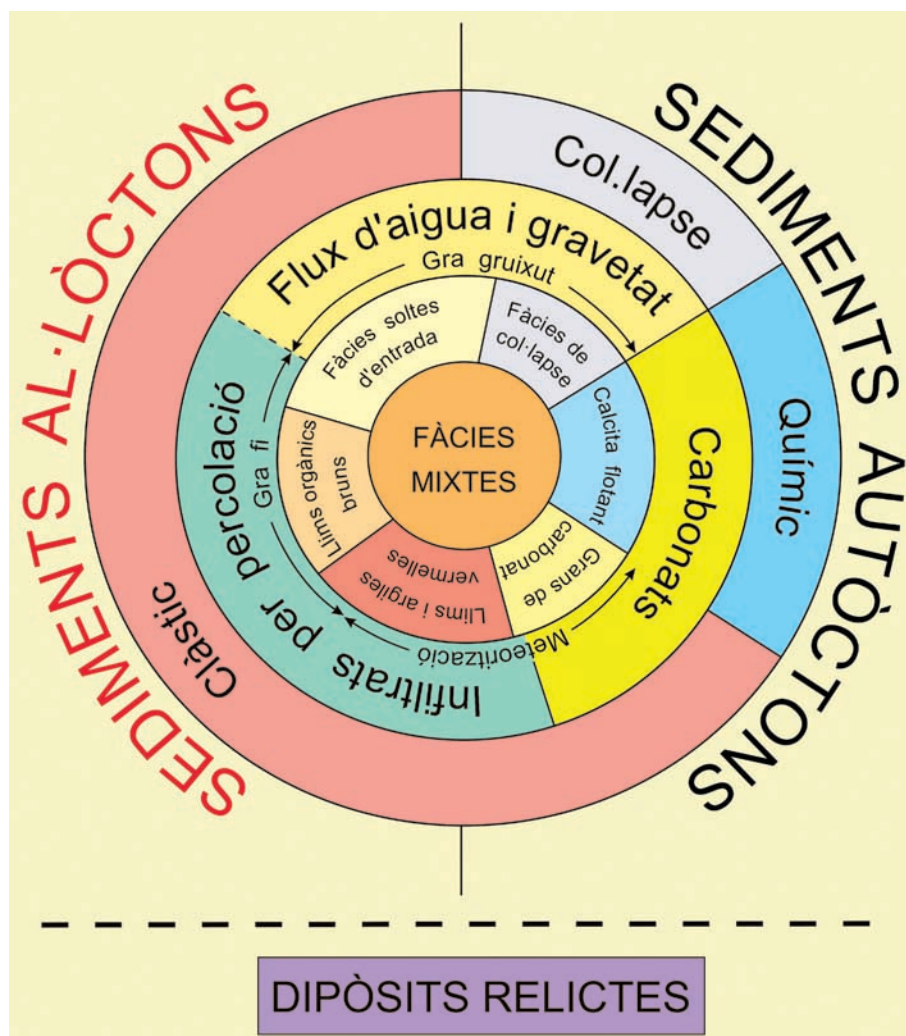


Figura 11: Fàcies sedimentàries i processos implicats en les cavitats litorals de les Illes Balears (modificat de FORNÓS *et al.*, 2009).

Figure 11: Sedimentary facies and involved processes into the coastal karst caves of Balearic islands (modified from FORNÓS *et al.*, 2009).

oscil·lacions pleistocenes del nivell marí. Això afavoreix en aquests punts la presència de les anomenades fàcies d'entrada. Aquestes es redueixen al material groller, clastes de dimensions molt variables subangulosos, aportats per les corrents tractives que s'introdueixen dins del sistema després de fortes tempestes i, sobretot a la zona litoral, materials relacionats amb la dinàmica de la zona costanera, sigui el procedent de l'arena de les platges com la procedent dels cordons de dunes litorals associats. La dinàmica paleoclimàtica i eustàtica ocorreguda durant el Quaternari, fa que aquests dipòsits, especialment els d'origen eòlic, hi siguin representats amb una certa abundor. El retreballament posterior d'aquestes arenes per esporàdiques revingudes pot introduir-les

més cap a l'interior, tal i com succeeix a la Galeria del Tragus a la Cova des Pas de Vallgornera (FORNÓS, et al., 2010).

Cas específic és l'omnipresent carst litoral que trobem a les costes de totes les illes, en el que la interrelació entre els processos continentals i marins li dona al reblliment sedimentari unes característiques especials presidides per la composició carbonatada del sediment i on s'hi poden distingir una sèrie de fàcies sedimentàries específiques i ben caracteritzades (Fig. 13). Així, en les zones en les quals hi trobem llacs d'aigües salabroses, la precipitació pel·lícula de calcita flotant a la superfície dels mateixos dona lloc a importants acumulacions al seu fons, afavorides pel degoteig constant

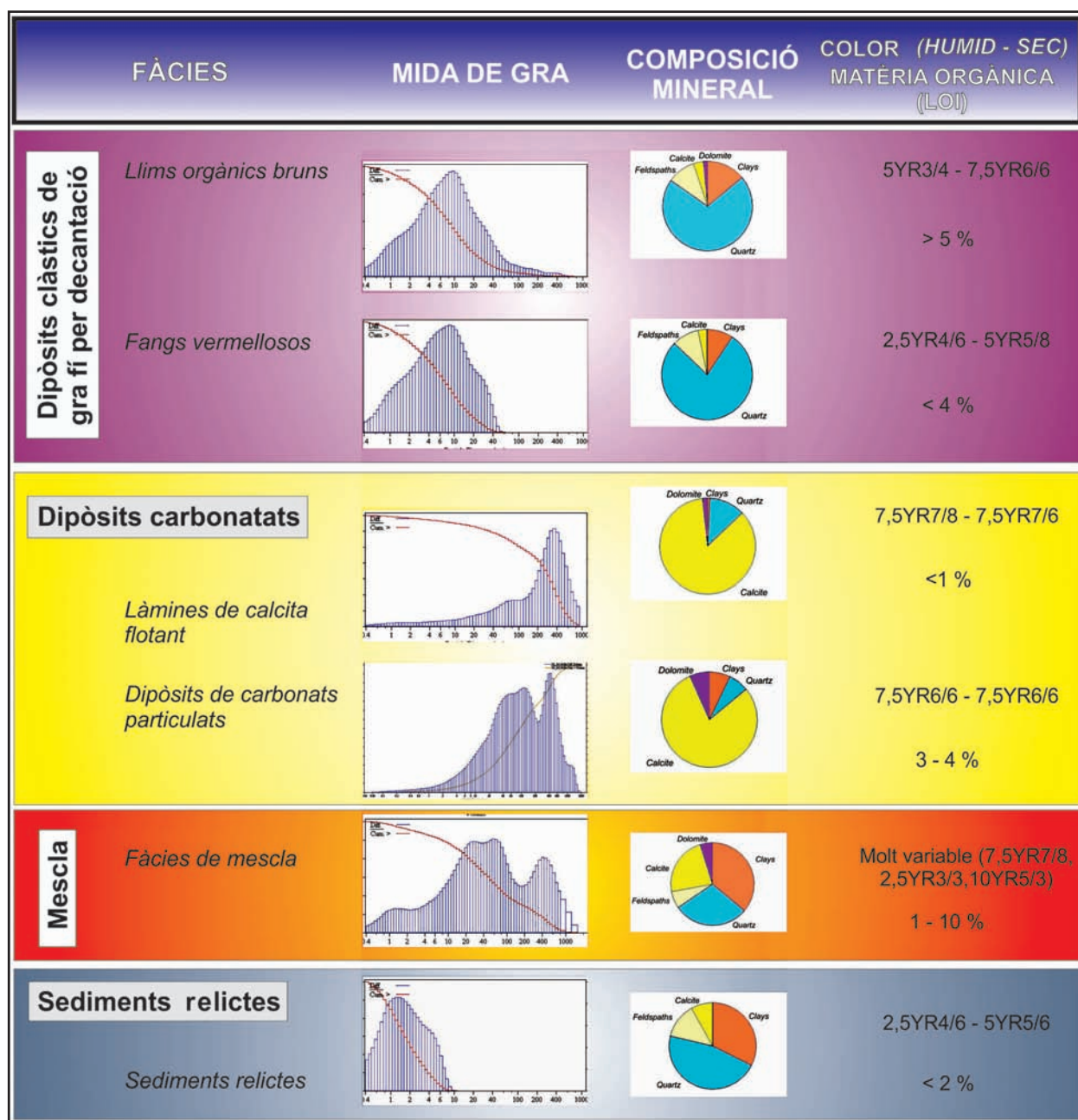


Figura 13: Característiques distintives de les fàcies sedimentàries presents en les cavitats litorals de les Illes Balears.

Figure 13: Distinctive characteristics of the sedimentary facies present into the coastal karst caves of Balearic islands.

des del sostre de la cavitat que les fa superar la tensió superficial que les mantenia en superfície. També dins la zona freàtica, la resposta diferent a la meteorització i corrosió de les parets de les galeries, formades per materials calcarenítics (bioclasts) amb diferent mineralogia i textura, afavoreixen la caiguda continuada dels grans mida arena no dissolts, que queden alliberats de les parets acumulant-se en el fons. Aquests sediments, característics dels carst litoral desenvolupat en el rocam calcari del Miocè superior, són més abundants a la zona de mescla d'aigües on la corrosió lligada a les haloclines és especialment important.

La variabilitat dels processos i aspectes morfològics al llarg de les cavitats fan que totes les característiques sedimentàries descrites es puguin donar en major o menor mesura interrelacionades, la qual cosa implica que la sedimentació present amb fàcies mesclades siguin de llarg les més abundants, especialment en el carst litoral, havent-se d'esbrinar en cada cas els diferents processos i les aportacions que les han produïdes.

En conclusió, el rebliment sedimentari de les cavitats a les Balears no és molt important des d'un punt de vista quantitatiu encara que puntualment pot presentar volums de certa consideració, però sí en canvi ho és des d'un punt de vista qualitatiu amb una gran varietat. L'estudi de les característiques de la variabilitat sedimentària permeten deixar clara constància de tota la munió de processos tant sedimentològics com geomorfològics que actuen dins del carst d'aquestes illes.

Agraïments

El present treball és una contribució al projecte de recerca finançat pel *Ministerio de Ciencia e Innovación*, CGL2010-18616/BTE.

Alguns dels estudis s'han pogut dur a terme al llarg d'aquests anys gràcies a que han estat parcialment finançats per l'Obra Social de SA NOSTRA dins els Projectes de Conservació de la Biodiversitat 2001, 2003, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010.

Bibliografia

BERGER, G.W.; PÉREZ-GONZÁLEZ, A.; CARBONELL, E.; ARSUAGA, J.L.; BERMÚDEZ DE CASTRO, J.M. & KU, T.L.- (2008): Luminescence chronology of cave sediments at the Atapuerca paleoanthropological site, Spain. *Journal of Human Evolution*, 55: 300-311.

BEUSELINCK, L.; GOVERS, G.; POESEN, J.; DEGRAER, G. & FROYEN, L. (1998): Grain-size analysis by laser diffraction: comparison with the sieve-pipette method. *Catena*, 32: 193-208.

BOSCH, R.F. & WHITE, W.B. (2004): Lithofacies and transport of clastic sediments in karstic aquifers. In: SASOWSKY, I.D. & MYLROIE, J. Eds. (2004): *Studies of cave sediments. Physical and Chemical Records of Paleoclimate*. New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1-22.

EGOZCUE, J.J. (1971): Estudio del cono de materiales alóctenos de la Cova de sa Font. *Speleon*, 18: 49-53.

FIOL, L.; FORNÓS, J.J.; GELABERT, B. & GUIJARRO, J.A. (2005): Dust rains in Mallorca (Western Mediterranean): Their occurrence and role in some recent geological processes. *Catena*, 63: 64-84.

FORD, D.C. & WILLIAMS, P.W. (2007): *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons Ltd. 562 p.

FORD, T.D. (2001): *Sediments in caves*. UK, BCRA Cave Studies Series, 9: 32 p.

FORNÓS, J.J. & GELABERT, B. (1995): Litologia i tectònica del carst de Mallorca. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) *El carst i les coves de Mallorca*. *Endins*, 20/Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 27-43.

FORNÓS, J.J. & GRÀCIA, F. (2007): Datació dels sediments recents que rebleixen les cavitats de sa Gleda i del Sistema Pirata-Pont-Piqueta: Primeres dades. *Endins*, 31: 97-100.

FORNÓS, J.J., BOVER, P., GINÉS, J. & MERINO, A. (2010): El rebliment sedimentari de la Galeria del Tragus a la Cova des Pas de Vallgornera (Llucmajor, Mallorca). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 53: (en premsa).

FORNÓS, J.J.; GINÉS, J. & GRÀCIA, F. (2009): Present-day sedimentary facies in the coastal karst caves of Mallorca Island (Western Mediterranean). *Journal of Caves and Karst Studies*, 71(1): 86-99.

GILLIESON, D. (1996): *Caves. Processes, development, management*. Blackwell Publishers. 324 p.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1974): Consideraciones sobre los mecanismos de fosilización de la Cova de sa Bassa Blanca y su paralelismo con formaciones marinas del Cuaternario. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 19: 11-28.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (1986): On the interest of speleochronological studies in karstified islands. The case of Mallorca (Spain). *Com. 9º Cong. Int. Espeleol.*, 1: 297-300. Barcelona.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) (1995a): *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. *Endins*, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3. 216 pàgs. Palma.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (2002): Estado actual del conocimiento científico del karst y de las cuevas de las islas Baleares / Estat actual del coneixement científic del carst i de les coves de les Illes Balears. *Boletín SEDECK*, 3: 26-45.

GINÉS, A. & GINÉS, J. (2007): Eogenetic karst, glacioeustatic cave pools and anchialine environments on Mallorca Island: a discussion of coastal speleogenesis. *International Journal of Speleology*, 36 (2): 57-67.

GINÉS, J. (2000): *El karst litoral en el levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología*. Tesis Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 595 pàgs + 29 llams. Inèdit.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (1995b): Aspectes espeleocronològics del carst de Mallorca / Speleochronological aspects of karst in Mallorca. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. *Endins*, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 99-112. Palma.

GINÉS, J. & GINÉS, A. (2011): Classificació morfogenètica de les cavitats càrstiques de les Illes Balears. *Endins*, 35: (aquest volum).

GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; TRIAS, M.; GINÉS, A. & SANTANDREU, G. (2007a): Els fenòmens endocàrstics de la zona de Ca n'Olesa: la Cova de s'Ònix i altres cavitats veïnes (Manacor, Mallorca). *Endins*, 31: 5-30.

GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, A. & TUCCIMEI, P. (2007b): 2.7. Endokarst costero, niveles marinos y tectónica: el ejemplo de la costa oriental de Mallorca. In: FORNÓS, J.J.; GINÉS, J. & GÓMEZ-PUJOL, L. (eds.) *Geomorfología litoral: Migjorn y Llevant de Mallorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 15: 201-220. Palma.

GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; GRÀCIA, F. & MERINO, A. (2008): Noves observacions sobre l'espeleogènesi en el Migjorn de Mallorca: els condicionants litològics en alguns grans sistemes subterranis litorals. *Endins*, 32: 49-79.

GOUDIE, A.S. & MIDDLETON, N.J. (2001): Saharan dust storms: Nature and consequences. *Earth-Science Reviews*, 56 (1-4): 179-204.

- GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; LANDRETH, R.; VICENS, D. & WATKINSON, P. (2001): Evidències geomorfològiques dels canvis del nivell marí. In: PONS, G.X. & GUIJARRO, J.A. (eds.) *El canvi climàtic: passat, present i futur*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 9: 91-119. Palma.
- GRÀCIA, F.; FORNÓS, J.J. i CLAMOR, B. (2007a): Cavitats costaneres de les Balears generades a la zona de mescla, amb importats continuïtats subaquàtiques, a PONS, G.X. i VICENÇ, D. (eds.), *Geomorfologia litoral i Quaternari*, Homenatge a Joan Cuerda Barceló. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 14: 299-352.
- GRÀCIA, F.; FORNÓS, J.J.; CLAMOR, B.; FEBRER, M. i GAMUNDÍ, P. (2007b): La Cova de sa Gleda I. Sector Clàssic, Sector de Ponent i Sector Cinc-cents (Manacor, Mallorca): Geomorfologia, espeleogènesi, sedimentologia i hidrologia. *Endins*, 31: 43-96.
- GRÀCIA, F.; FORNÓS, J.J.; CLAMOR, B.; JAUME, D. i FEBRER, M. (2006): El sistema Pirata-Pont-Piqueta (Manacor, Mallorca): Geomorfologia, espeleogènesi, hidrologia, sedimentologia i fauna. *Endins*, 29: 25-64.
- GRÀCIA, F.; GAMUNDÍ, P.; CLAMOR, B.; TRIAS, M.; FORNÓS, J.J.; FEBRER, M. & POCOVÍ, J. (2010): Noves aportacions a l'estudi de les cavitats de Cala Falcó - Cala Varques (Manacor, Mallorca). *Endins*, 34: 141-154.
- MATEU, G.; COLOM, G. & CUERDA, J. (1979): Los foraminíferos plio-pleistocénicos de la isla de Cabrera (Balears) y las condiciones paleoecológicas del antiguo mar balear (contribución a su conocimiento). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 23: 51-68.
- MONTORIOL-POUS, J. (1972): Estudio de una captura kárstico-marina en la isla de Cabrera. *Acta Geológica Hispánica*, 6 (4): 89-91.
- PALMER, A.N. (2007): *Cave geology*. Cave Books. 454 p. Dayton, Ohio, USA.
- PONS-MOYÀ, J.; MOYÀ-SOLÀ, S. & KOPPER, J.S. (1979): La fauna de mamíferos de la Cova de Canet (Esporles) y su cronología. *Endins*, 5-6: 55-58.
- QUINTANA, J. & ARNAU, P. (2004): Descripció dels rastres i les petjades d'*Hypnomys* Bate, 1918 (Mammalia: Gliridae) de la Cova de sa Duna (Alaior, Menorca). *Endins*, 26: 7-14.
- SASOWSKY, I.D. & MYLROIE, J. Eds. (2004): *Studies of cave sediments. Physical and Chemical Records of Paleoclimate*. New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 329 p.
- TUCKER, M. (1988): *Techniques in Sedimentology*. Blackwell, 394 p.
- VAN HENGSTUM, P.J.; SCOTT, D.B.; GRÖCKE, D.R. & CHARETTE, M.E. (2011): Sea level controls sedimentation and environments in coastal caves and sinkholes. *Marine Geology*, 286: 35-50.
- WHITE, W.B. (2007): Cave sediments and paleoclimate. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69 (1): 76-93.